

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.06.003

基于 ORB 的交叉双旋翼无人直升机视觉跟踪控制系统

席鹏航¹, 李京阳^{1,2}, 印明威³, 杨洪伟⁴, 宝音贺西^{5,6}

(1. 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387; 2. 中北大学航空宇航学院, 太原 030051; 3. 北京清航紫荆装备科技有限公司, 北京 102101; 4. 南京航空航天大学航天学院, 南京 211106; 5. 清华大学航空航天学院, 北京 100084; 6. 内蒙古工业大学航空学院, 呼和浩特 010051)

摘要: 为了使交叉双旋翼无人直升机在全球定位系统(Global positioning system, GPS)信号不稳定的情况下实现对目标的视觉跟踪,设计了一种交叉双旋翼无人直升机视觉跟踪控制系统。首先,设计了一种视觉模块,对跟踪目标进行图像处理,利用基于方向性快速的特征点检测和旋转 BRIEF(Oriented FAST and rotated BRIEF, ORB)描述子特征匹配和矩形检测,获取跟踪目标的中心点像素坐标,通过相机模型和旋转矩阵解算出跟踪目标的中心点实际位置。然后,设计了一种跟踪控制模块,采用串级比例积分微分(Proportional-integral-derivative, PID)加前馈的控制结构,为了限制极限位置和最大加速度,位置控制中采用平方根控制器,姿态控制中设计了一种交叉双旋翼姿态控制机构。之后,通过飞控地面站搭建仿真环境,对添加视觉模块的飞行控制系统进行仿真验证,结果表明,无人直升机可以很好地跟踪到视觉模块输出的期望位置。最后,进行实验验证,在设定最大飞行速度为 1 m/s 的条件下,姿态角最大为 8°左右,位置与期望位置之间的误差最大为 0.08 m,可以实现交叉双旋翼无人直升机对目标的视觉跟踪。

关键词: 交叉双旋翼无人直升机;视觉跟踪;特征匹配;位置控制;姿态控制

中图分类号:V249

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2023)06-0966-11

A Visual Tracking Control System for Intermeshing-Rotor Unmanned Helicopters Based on ORB

XI Penghang¹, LI Jingyang^{1,2}, YIN Mingwei³, YANG Hongwei⁴, BAORYIN Hexi^{5,6}

(1. School of Mechanical Engineering, TianGong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. Beijing TsingAero Armament Technology Co., Ltd., Beijing 102101, China; 4. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China; 5. School of Aeronautics and Astronautics, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 6. School of Aviation, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: To enable visual tracking of targets by intermeshing-rotor unmanned helicopters in the presence of unstable global positioning system (GPS) signals, a visual tracking control system for intermeshing-rotor unmanned helicopters is designed. Firstly, a vision module is designed to perform image processing on tracked targets, obtain the pixel coordinates of the center point of the tracked target using oriented FAST and rotated BRIEF (ORB) feature matching and rectangle detection. Thus, the actual position of the center point of the tracked target is solved by the camera model and the rotation matrix. Secondly, a tracking control module is designed with a serial proportional-integral-derivative (PID) plus feed-forward control structure. An

基金项目: 国家自然科学基金(11602123);内蒙古自治区杰出青年培育基金(2019JQ002)。

收稿日期: 2023-09-29; **修订日期:** 2023-11-30

通信作者: 李京阳,男,博士,教授,博士生导师, E-mail:18911638156@163.com。

引用格式: 席鹏航,李京阳,印明威,等. 基于 ORB 的交叉双旋翼无人直升机视觉跟踪控制系统[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(6): 966-976. XI Penghang, LI Jingyang, YIN Mingwei, et al. A visual tracking control system for intermeshing-rotor unmanned helicopters based on ORB[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(6): 966-976.

open-square controller is used in the position control in order to limit the limit position and maximum acceleration, and an intermeshing-rotor attitude control mechanism is designed in the attitude control. Then, the simulation environment is built by the flight control ground station to simulate and verify the flight control system with the added vision module. The results show that the unmanned helicopter can track the desired position output from the vision module very well. Finally, the experimental validation is conducted under the conditions of the maximum flight speed of 1 m/s, the maximum attitude angle of about 8° , and the maximum error of 0.08 m between the position and the desired position. The experiment demonstrates that the proposed system can fulfill the visual tracking of the intermeshing-rotor unmanned helicopter for the target.

Key words: intermeshing-rotor unmanned helicopter; visual tracking; feature matching; position control; attitude control

交叉双旋翼无人直升机具有两对倾斜旋翼,呈交叉构型,具有优秀的侧向稳定性和载荷能力,被称为“空中卡车”^[1],适合进行海上巡逻和海上运输等工作。在完成巡逻、运输等工作后,无人直升机需要平稳的降落在指定目标位置上,这就需要无人直升机具有优秀的自主降落能力^[2]。天气因素、噪声干扰等会影响全球定位系统(Global positioning system, GPS)导航的信号稳定性^[3],传统惯性导航由于陀螺仪漂移和积分的存在容易造成误差累积^[4],而视觉导航可以通过外部环境获取位置信息,具有更好的抗信号干扰能力和独立性^[5]。因此,为了使无人直升机精确跟踪到目标正上方,在自主降落过程中的近地阶段,利用视觉导航对降落目标进行跟踪。

对于视觉跟踪中环境影响和鲁棒性问题,文献[6]在目标处于相机中心范围内的问题上,采用基于图像的视觉伺服方法,同时与目标保持固定距离,通过前视相机来跟踪目标,提高了抗干扰能力和鲁棒性。文献[7]在与目标保持固定距离的问题上,开发了精确相机定位和快速处理图像的万向节子系统,并基于神经网络数据库提高目标识别性能,提高了目标跟踪和识别框架的鲁棒性。文献[8]在复杂环境造成目标遮挡的问题上,利用核相关滤波器重新检测算法,根据视觉信息来估计无人机状态,使无人机能够自主跟踪目标,提高了对于目标遮挡和损失情况的鲁棒性。文献[9]提出了基于方向性快速的特征点检测和旋转 BRIEF 描述子(Oriented FAST and rotated BRIEF, ORB)特征点的参数全局运动补偿方法,结合跟踪学习检测(Tracking-learning-detection, TLD)算法和目标面积特征,通过图像的视觉伺服控制器,实现动态场景下的移动目标跟踪,提高了飞行环境的鲁棒性。文献[10]提出一种基于粒子滤波方法的上升段飞行器目标视频图像跟踪方法,建立飞行器目标粒子滤波跟踪模型实现对飞行器目标的识别和跟踪,提高了目标的跟踪效果和鲁棒性。

对于视觉跟踪中跟踪精度和准确性问题,文献[11]提出一种单目视觉估计微型飞行器位姿并构建室内环境的方法,给出一种局部优化方法求解相机运动参数和特征点位置参数的最大似然估计,提高位姿估计和环境构建的精度,实现微型飞行器室内环境中的视觉导航控制;在此基础上,文献[12]防止室内复杂环境的影响,提出了连续跟踪预先指定的定向圆形物体,并保持固定距离使其大致位于图像平面中心的方法,通过航位推算来估计无人机运动状态,提高了无人机跟踪精度;文献[13]对于预先指定的样本图像,利用以 SURF-BoW 特征描述样本图像,对 SVM 分类器进行线下训练,通过改进后基于上下文信息相关性的中值流跟踪算法进行目标跟踪,增加了无人机自主降落长时间目标跟踪的实时性和准确性。在特征训练基础上,文献[14]基于平行线特征,提出一种基于线段检测子直线识别得结构性特征检测与匹配方法,实现对航母表面各种结构、标志角点得准确识别,有效提高视觉定位精度。

综上所述,原有方法在交叉双旋翼无人直升机视觉跟踪问题中缺乏应用,交叉双旋翼的滚转控制更加灵活,对于原有特征匹配算法容易造成目标匹配失败,本文提出一种矩形识别融合基于 ORB 特征匹配的视觉跟踪控制系统。首先,设计由 4 个同心矩形构成的跟踪目标;然后,搭建由目标处理单元、特征识别单元、位置解算单元组成的视觉模块,通过目标处理,变为黑白图像,利用特征识别检测出目标特征信息,通过位置解算得出期望位置;之后,搭建串级比例积分微分(Proportional-integral-derivative, PID)跟踪控制模块,实现对目标的跟踪控制;最后,通过仿真和实验验证基于 ORB 的交叉双旋翼无人直升机视觉跟踪控制系统的可行性与有效性。

1 目标与系统模型

1.1 目标设计

无人直升机视觉跟踪过程中需要实时获取跟

踪目标,通过视觉模块进行处理与识别。因此,跟踪目标的识别要具有实时性、准确性和有效性^[15]。

为了跟踪目标能够准确、快速地被识别,本文设计一种由4个黑白相间的同心矩形组成的跟踪目标,如图1所示。

图1中有4个同心矩形,分别是边长为800、400、200和100 mm的正方形,矩形中心点即为实现视觉跟踪的目标中心点。

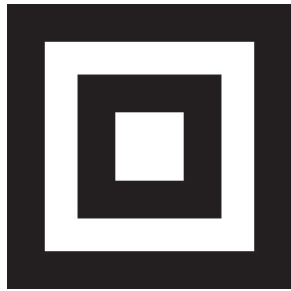


图1 跟踪目标
Fig.1 Tracked target

1.2 系统模型

视觉跟踪控制系统由视觉模块和跟踪控制模块组成,视觉模块将目标中心位置发送给跟踪控制模块,跟踪控制模块分为位置控制和姿态控制,构成内外环结构,位置控制分为水平控制和高度控制,水平控制通过姿态控制来实现,进而实现对目标中心位置的视觉跟踪,视觉跟踪控制系统如图2所示。

图2中: x, y, z 定义在机体坐标系下; $\Delta x, \Delta y$ 分别为 x, y 方向上的相对位置; v_x, v_y 分别为 x, y 方向的速度; a_x, a_y 分别为 x, y 方向的加速度; θ, φ, ψ 分别为俯仰角、滚转角、偏航角; $\theta_e, \varphi_e, \psi_e$ 分别为期望俯仰角、期望滚转角、期望偏航角; $\omega_\theta, \omega_\varphi, \omega_\psi$ 分别为俯仰角速度、滚转角速度、偏航角速度; h 为 z 方向上的相对高度; v_h 为 z 方向上的速度; a_h 为 z 方向

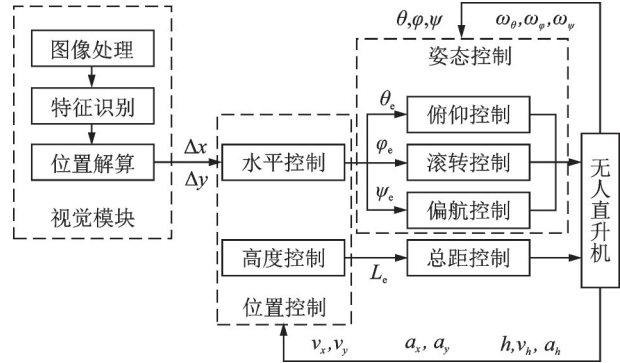


图2 视觉跟踪控制系统

Fig.2 Visual tracking control system

上的加速度; L_e 为期望总距。

2 视觉模块

2.1 目标处理单元

为了将图像变得更清晰,同时占用更少的储存空间,方便后续进行特征识别,对图像进行灰度化处理,将RGB彩色图像转化为灰度图像^[16]。

由于环境因素等影响,会产生噪声,导致特征识别出现误检,影响位置解算的准确性。因此,为了削弱噪声,对灰度图像进行滤波处理。滤波算法中,目标点的像素值通常是由其所在位置局部邻域像素值所决定。为了保持原始图像的边缘,采用灰度双边滤波处理,在采样时不仅考虑像素在空间距离上的关系,同时引入像素间的相似度考虑。考虑两个像素之间在空间距离上的关系,通过高斯分布的曲线可以发现,离目标像素越近的对最终结果的贡献越大,反之则越小。考虑两个像素之间的相似度,加入相似度权重,像素值越接近,对最终结果的贡献越大,反之则越小。综合考虑空间距离和相似度,灰度双边滤波公式描述如下

$$\begin{cases} h(x) = k^{-1}(x) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) c(\xi, x) s(f(\xi), f(x)) d\xi \\ k(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} c(\xi, x) s(f(\xi), f(x)) d\xi \end{cases} \quad (1)$$

式中: $h(x)$ 为滤波后像素值, $f(\xi)$ 为滤波前像素值, $c(\xi, x)$ 为空间距离权重, $s(f(\xi), f(x))$ 为相似度权重, $k(x)$ 为单位化处理。式(1)是连续的无限积分,像素图中是无法实现的,需要进行离散化,得

$$h(x) = k^{-1}(x) \sum_{\Omega} f(\xi) c(\xi, x) s(f(\xi), f(x)) \quad (2)$$

式中对 $c(\xi, x)$ 和 $s(f(\xi), f(x))$ 进行离散化求和。

为了将目标与背景完全区分,对滤波图像进行分割处理^[17],将滤波图像转化为黑白图像。通过阈值编辑器确定灰度值范围为133~255,将范围

内的灰度值变为255,即为白色,将范围外的灰度值变为0,即为黑色。

2.2 特征识别单元

通过矩形检测和ORB特征匹配^[18]分别提取目标的中心点像素坐标,经过均值滤波处理,得出最终的中心点像素坐标。

矩形检测利用四元检测算法实现,通过Sobel算子检测图像梯度,进行Canny边缘检测,对边缘进行分割合并,同时对梯度边缘进行线段聚类处理,通过深度优先搜索进行四边形逼近,寻找矩形。

步骤 1 对图中的边缘点进行聚类处理,利用加权最小二乘法来拟合直线方程,得到 l_1 、 l_2 为端点的有向线段;

步骤 2 对所有线段进行分组,规则为上一条线段端点与下一条线段起点之间的距离小于阈值,同时两条线段组成的方向为逆时针;

步骤 3 将所有线段构成一个树,每层节点为上一层的同组线段;

步骤 4 利用深度优先搜索,遍历树,如果在深度为 4 的时候 4 条线段形成闭环,则构成矩形。

返回一个由 4 个顶点组成的数组代表矩形,通过矩形中心点算法获取矩形中心点像素坐标。

ORB 特征匹配利用 FAST 角点检测和旋转 BRIEF 描述子对预先存储的目标图像与实时拍摄的目标图像进行匹配。FAST 角点定义为:若某像素点与其周围邻域内足够多的像素点处于不同的区域,则该像素点可能为角点,如图 3 所示。

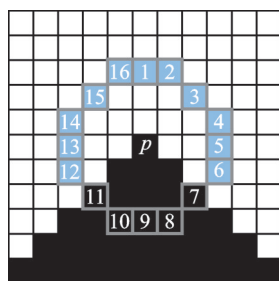


图 3 FAST 角点检测

Fig.3 FAST corner detection

步骤 1 选择像素点 p , 其像素值为 I_p , 以 p 为圆心, 取半径为 3 的离散化 Bresenham 圆, 圆边界上有 16 个像素, 记为 $[p_1, p_2, \dots, p_{15}, p_{16}]$ 。

步骤 2 设定一个阈值 t , 取 $t = 0.2I_p$ 。

步骤 3 使第 1、5、9、13 个边界像素点与中心像素点 p 作差, 如果其中至少有 3 个边界像素点满足大于 $I_p + t$ 或小于 $I_p - t$ 则继续进行步骤 4, 否则判断为不是角点。此步骤可以大大提高检测效率, 提高实时性。

步骤 4 使圆边界上的 16 个像素点分别与中心像素点 p 作差, 如果连续有 n 个像素点的值都大于 $I_p + t$ 或小于 $I_p - t$, 那就把中心像素点 p 作为候选角点, 取 $n = 12$ 。

步骤 5 由于经过检测后的多个候选角点容易挤在一起, 进行非极大值抑制, 计算中心像素点 p 与 16 个边界像素点的绝对偏差的和, 记为响应值 V , 设计 5×5 的模板, 检测模板邻域内的候选角点响应值 V , 保留邻域内响应值最大的候选角点, 删除其余候选角点。

FAST 角点检测的最大优势为速度快, 但是

FAST 角点本身不具有旋转不变性和缩放不变性, 为了使其具有旋转不变性, ORB 采用灰度质心法, 利用图像几何中心与灰度质心的连线来确定旋转角度, 如图 4 所示。

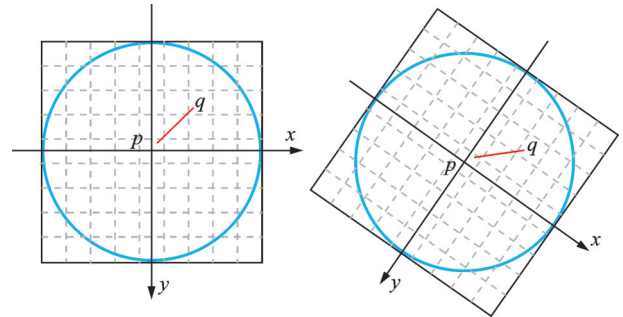


图 4 灰度质心法

Fig.4 Grayscale centroid method

图 4 中: p 为目标中心点; q 为灰度质心。图像像素灰度总和为

$$M_{00} = \sum_{x=-R}^R \sum_{y=-R}^R I(x, y) \quad (3)$$

图像 x 和 y 方向灰度总和为

$$\begin{cases} M_{10} = \sum_{x=-R}^R xI(x, y) \\ M_{01} = \sum_{y=-R}^R yI(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

灰度质心坐标为

$$\begin{cases} Q_x = \frac{M_{10}}{M_{00}} \\ Q_y = \frac{M_{01}}{M_{00}} \end{cases} \quad (5)$$

旋转角度为

$$\theta = \arctan \frac{M_{01}}{M_{10}} \quad (6)$$

FAST 角点不具有缩放不变性, 本文采用构造图像金字塔来实现特征点的缩放不变性。对图像进行高斯滤波采样处理, 如图 5 所示。

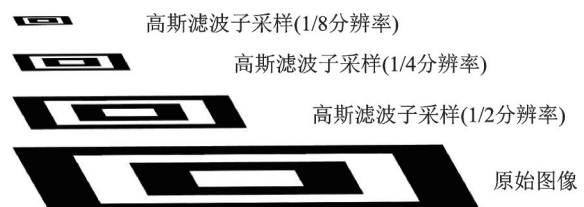


图 5 高斯图像金字塔

Fig.5 Gaussian image pyramid

步骤 1 对图像进行高斯滤波处理;

步骤 2 进行子采样, 删除原图像的偶数行和列, 图像分辨率变为原图像的 1/2, 图像尺寸变为原图像的 1/4;

步骤3 对每一层图像进行FAST角点检测,提取每一层图像的特征信息;

步骤4 将每一层图像的特征信息组合,作为原始图像的特征信息。

BRIEF是一种二进制的描述子,放弃传统灰度直方图描述特征的方法,采用二进制进行位异或运算,计算特征描述子的Hamming距离,完成特征点的匹配,BRIEF描述子的优势为占用内存小、运行时间短、运行速度快。

步骤1 在特征点 31×31 的邻域内,通过符合 $(0, 1/25S^2)$ 的高斯分布准则采样生成 n 个 (x, y) 点对,取 $n = 512$;

步骤2 对于任意特征点的 n 个 (x, y) 点对,用矩阵来表示

$$D = \begin{bmatrix} x_1, x_2, \dots, x_n \\ y_1, y_2, \dots, y_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

步骤3 利用FAST求出的角点方向 θ 和对应的旋转矩阵 R_θ 解算出旋转后的点对集为

$$D_\theta = R_\theta D = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} D \quad (8)$$

步骤4 选择每一个随机点对,取 5×5 的模板窗口,比较 (x, y) 两点的模板平均像素值大小,并进行编码,如果 $I_x < I_y$,则编码为1,如果 $I_x > I_y$,则编码为0,即

$$\tau(x, y) = \begin{cases} 1 & I_x < I_y \\ 0 & I_x \geq I_y \end{cases} \quad (9)$$

计算旋转BRIEF描述子为

$$f_n(p, \theta) = \sum_{1 \leq i < j \leq n} 2^{i-1} \tau(x_i, y_j) s \quad (10)$$

式中 $(x_i, y_i) \in D_\theta$;

步骤5 对特征描述子编码进行位异或运算,即两段编码对应位不同的数量,统计结果为0的个数,计算特征描述子的Hamming距离。

步骤6 判断特征点Hamming距离的大小,如果大于 $n/2$,则判断为不匹配,如果小于等于 $n/2$,则判断为匹配。

如果大于两对特征点完成匹配,则判定为图像匹配成功,返回一个Kptmatch类对象,可以通过类对象来索引特征的矩形框角点坐标、矩形框长宽、矩形框中心点等信息。

2.3 位置解算单元

为了实现交叉双旋翼无人直升机对目标的视觉跟踪,要确定无人直升机与目标之间的相对位置,经过特征识别单元处理,可以解算出目标的中心点像素坐标,利用相机模型和旋转矩阵,将中心点像素坐标转化为机体和目标中心点之间的相对位置。

由相机坐标系转换为像素坐标系的相机模型如图6所示。

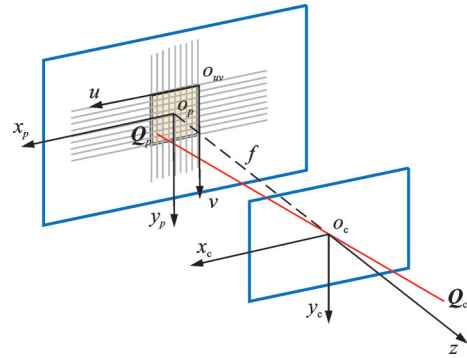


图6 相机模型

Fig.6 Camera model

图6中:定义 $o_w uv$ 为像素坐标系; $Q_w = [u \ v \ 1]^T$ 为像素坐标系中的中心点坐标; $o_p x_p y_p z_p$ 为图像坐标系; $Q_p = [x_p \ y_p \ 1]^T$ 为图像坐标系中的中心点坐标; $o_c x_c y_c z_c$ 为相机坐标系; $Q_c = [x_c \ y_c \ z_c]^T$ 为相机坐标系中的中心点坐标; f 为相机焦距。

像素坐标系和图像坐标系在相同的成像平面,只有原点和度量单位不同,对图像坐标系进行缩放和平移,变为像素坐标系为

$$Q_w = \begin{bmatrix} \delta_x & 0 & 0 \\ 0 & \delta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Q_p + \eta \quad (11)$$

式中: δ_x 和 δ_y 分别为 x 和 y 方向上的缩放系数; $\eta = [\eta_x \ \eta_y \ 0]^T$, η_x 和 η_y 分别为 x 和 y 方向上的平移系数。

相机坐标系到图像坐标系是光学成像的过程,因此,可以通过光学成像原理,将相机坐标系转化为图像坐标系为

$$Q_p = \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Q_c \quad (12)$$

根据式(11,12)可得,由相机坐标系转化为像素坐标系为

$$Q_w = \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} f_x & 0 & \eta_x \\ 0 & f_y & \eta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Q_c = \frac{1}{z_c} K Q_c \quad (13)$$

式中: $f_x = \delta_x f$, $f_y = \delta_y f$; K 为相机内参矩阵,可以根据相机标定得出。

通过旋转矩阵和平移矩阵,可以将世界坐标系转化为相机坐标系为

$$Q_c = R Q_w + T \quad (14)$$

式中: $\mathbf{Q}_w = [x_w \ y_w \ z_w]^T$ 为世界坐标系中的中心点坐标; \mathbf{R} 和 T 分别为世界坐标系到相机坐标系的 3×3 旋转矩阵和 3×1 平移矩阵; $T = [T_x \ T_y \ T_z]^T$, 其中 T_x, T_y, T_z 分别为 x, y, z 方向上的相对位置。

综上所述,由世界坐标系转化为像素坐标系的公式为

$$\mathbf{Q}_{uv} = \frac{1}{z_c} \mathbf{K} \mathbf{Q}_c = \frac{1}{z_c} \mathbf{K} (\mathbf{R} \mathbf{Q}_w + T) \quad (15)$$

式中: $z_c = T_z / (\cos\theta \cos\varphi) = h / (\cos\theta \cos\varphi)$, h 为相机距离地面的高度,通过GPS将实时高度和初始地面高度做差获得; θ, φ 分别为俯仰角和滚转角。通过式(15)可以解出 T_x 和 T_y , 由于设置相机在无人直升机中心点下方,此时的 x 和 y 方向上的相对位置 Δx 和 Δy 就是 T_x 和 T_y 。

3 跟踪控制模块

经过视觉模块处理后,确定了水平方向的相对位置,为了使交叉双旋翼无人直升机实现目标跟踪,需要设计跟踪控制模块。跟踪控制模块分为位置控制和姿态控制,构成内外环结构,位置控制通过姿态控制来实现。位置控制和姿态控制的PID参数通过工程经验法进行整定。首先,仅开启比例环节,比例度放在较大的数值上;其次,当系统稳定后,做阶跃响应,直至衰减比为4:1,记录下此时的比例度和衰减周期;最后,通过经验公式求解出PID控制器参数,将比例度放在计算值略大的数值上,逐步引入积分和微分环节,观察并适当调整。

3.1 位置控制

位置控制采用串级PID的控制结构,为了限制极限位置和最大加速度,外环采用平方根控制器,如图7所示。

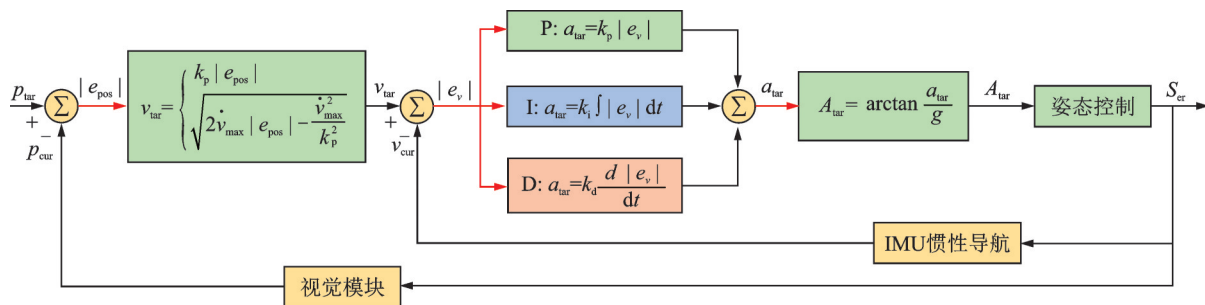


图7 位置控制

Fig.7 Position control

图7中: p_{tar}, p_{cur} 分别为期望位置、当前位置; v_{tar}, v_{cur} 分别为期望速度、当前速度; e_v 为速度误差; a_{tar} 为期望加速度; A_{tar} 为期望姿态角; g 为物理加速度; S_{cr} 为舵机信号。交叉双旋翼位置控制PID参数如表1所示。

表1 交叉双旋翼位置控制PID参数

Table 1 Position control PID parameters of the inter-meshing-rotor

控制参数	位置
k_p	0.8
k_i	0.4
k_d	0

位置控制外环对P控制器进行优化,变为平方根控制器,用来限制最大加速度和极限位置,保障无人直升机的飞行安全。

假定 t 时间内速率不变, P 控制器为

$$\begin{cases} v_{tar} = k_p |e_{pos}| \\ v_{tar} = \frac{|e_{pos}|}{t} \end{cases} \quad (16)$$

式中: k_p 为比例系数,取 $k_p = 1$; $|e_{pos}|$ 为位置误差。对式(16)求导立得

$$\begin{cases} \dot{v}_{tar} = -k_p^2 |e_{pos}| \\ k_p = \frac{1}{t} \end{cases} \quad (17)$$

式中: \dot{v}_{tar} 为加速度。由式(17)可知,在 $|e_{pos}|$ 收敛为0的过程中, \dot{v}_{tar} 是变化的,与 k_p^2 成正比。

加速度 \dot{v}_{tar} 具有最大值,整个飞行过程中 $\dot{v}_{tar} \leq \dot{v}_{max}$, 因此,当 $|e_{pos}| > \dot{v}_{tar} / k_p^2$ 时, $\dot{v}_{tar} = \dot{v}_{max}$, 即

$$\begin{cases} v_{tar}^2 - \dot{v}_{tar}^2 t^2 = 2\dot{v}_{max} s \\ s = |e_{pos}| - \dot{v}_{max} t^2 \end{cases} \quad (18)$$

式中 s 为飞行距离。联立式(17,18)可得

$$v_{tar} = \sqrt{2\dot{v}_{max}|e_{pos}| - \frac{\dot{v}_{max}^2}{k_p^2}} \quad (19)$$

式中 \dot{v}_{max} 为最大加速度。平方根控制器为

$$v_{tar} = \begin{cases} k_p |e_{pos}| & |e_{pos}| \leq \frac{\dot{v}_{max}}{k_p^2} \\ \sqrt{2\dot{v}_{max}|e_{pos}| - \frac{\dot{v}_{max}^2}{k_p^2}} & |e_{pos}| > \frac{\dot{v}_{max}}{k_p^2} \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)可知,取 $\dot{v}_{\max}/k_p^2 = 5$,平方根控制器函数如图8所示。

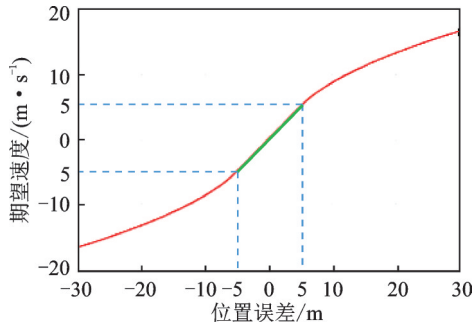


图8 平方根控制器

Fig.8 Square root controller

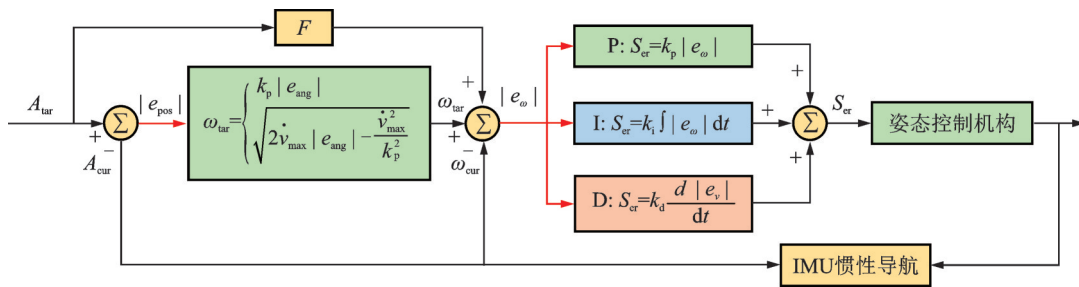


图9 姿态控制

Fig.9 Attitude control

表2 交叉双旋翼姿态控制PID参数

Table 2 Attitude control PID parameters of the inter-meshing-rotor

控制参数	滚转	俯仰	偏航
k_p	5	5	3
k_i	0.135	0.135	0.009
k_d	0	0	0

交叉双旋翼的姿态控制通过2个倾斜盘和6个数字舵机来实现,为了获取最大升力系数,取2个旋翼竖直夹角为 24° ,为防止桨叶碰撞,旋翼水平夹角为 90° ,如图10所示。

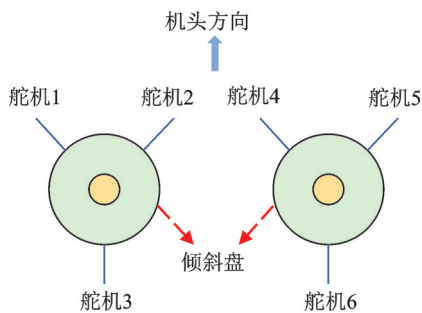


图10 姿态控制机构

Fig.10 Attitude control mechanism

(1)滚转控制:舵机1、4上推,舵机2、5下拉,舵机3、6不变,倾斜盘向右倾斜,实现交叉双旋翼的向右滚转运动;

由图8可知,当 $|e_{\text{pos}}| \leq 5$ 时,函数为 $k_p = 1$ 的直线,此时为P控制器;当 $|e_{\text{pos}}| > 5$ 时,函数为平方根曲线,此时为平方根控制器。

3.2 姿态控制

姿态控制采用串级PID加前馈的控制结构,外环采用P控制器,内环采用PID控制器,姿态控制瞬时响应采用400 Hz的控制频率,如图9所示。图9中: A_{tar} 、 A_{cur} 分别为期望姿态角、当前姿态角; e_{ang} 为姿态角误差; F 为姿态角前馈量; ω_{tar} 、 ω_{cur} 分别为期望姿态角速度、当前姿态角速度; e_{ω} 为姿态角速度误差。交叉双旋翼控制参数如表2所示。

(2)俯仰控制:舵机3、6上推,舵机1、2、4、5下拉,倾斜盘向前倾斜,实现交叉双旋翼的向前俯仰运动;

(3)偏航控制:舵机3、4、5上推,舵机1、2、6下拉,左倾斜盘向前倾斜,右倾斜盘向后倾斜,实现交叉双旋翼的向右偏航运动。

若舵机反方向运动,则交叉双旋翼姿态同样反方向运动。

4 仿真实验

通过 Mission Planner 地面站搭建飞控仿真环境,利用交叉双旋翼飞控代码,进行仿真实验,仿真步骤如下:

- 步骤1 输入 arm throttle 指令解锁无人直升机;
- 步骤2 输入 rc31900 指令使其油门最高起飞;
- 步骤3 输入 rc31500 指令使其油门回中位,保持高度稳定;
- 步骤4 输入 mode guided 指令使其切换为导引模式。

切换为导引模式后,无人直升机开始仿真飞行,0~10 s内模拟 OpenMV 检测目标在像素(160, 60)处,目标在图像上方,无人直升机向前飞行;10~20 s内模拟 OpenMV 检测目标在像素(240, 120)处,目标在图像右方,无人直升机向右飞行;20~30 s内模拟 OpenMV 检测目标在像素(160, 180)处,目标在

图像下方,无人直升机向后飞行;30~40 s内模拟 OpenMV 检测目标在像素(80, 120)处,目标在图像左方,无人直升机向左飞行,最终回到指定位置降落。飞行路线如图 11 所示。



图 11 仿真飞行
Fig.11 Simulated flight

仿真飞行东向(x 方向)和北向(y 方向)位置与期望位置曲线如图 12 和图 13 所示。通过仿真位置与期望位置曲线可以得出,添加视觉模块的飞行控制系统具有良好的跟踪能力。

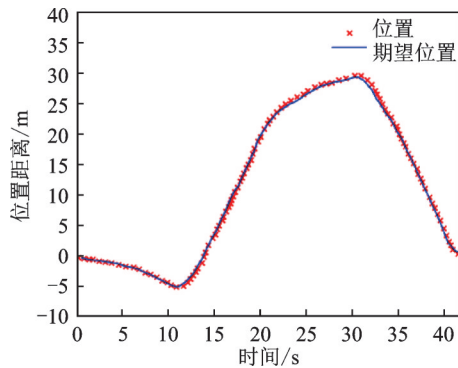


图 12 仿真东向位置与期望位置

Fig.12 Simulated eastward position and desired position

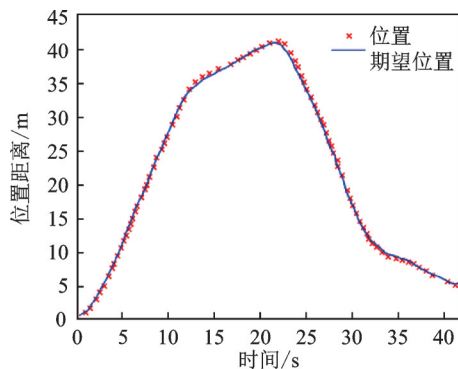


图 13 仿真北向位置与期望位置

Fig.13 Simulated northward position and desired position

5 实验验证

本实验视觉模块采用 OpenMV4 H7 Plus 摄像头,如图 14 所示。相机内参 K 为

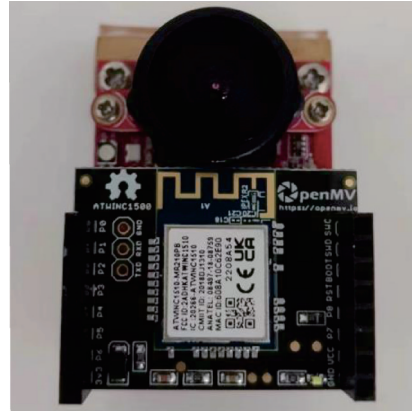


图 14 OpenMV4 H7 Plus 摄像头

Fig.14 OpenMV4 H7 Plus camera

$$K = \begin{bmatrix} 287.2157 & 0.2128 & 167.4881 \\ 0 & 287.9823 & 130.9559 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

单一 ORB 特征匹配视觉跟踪存在匹配失败的情况,当特征匹配失败时,无人直升机需要迅速做出反应寻找目标。交叉双旋翼无人直升机重量大、不灵活,无法对于控制变化做出迅速反应,因此需要提高视觉识别的准确率,ORB 特征匹配融合矩形识别,避免匹配失败的情况下无法对目标进行实时跟踪,视觉模块仿真如图 15 所示。



(a) Successful image (b) Failed image

```

矩形得出中心点x坐标为: 155.999994 矩形得出中心点y坐标为: 112.500000
未找到特征点q_x = 159.999990 未找到特征点q_y = 119.999992
FPS 5.963245
矩形得出中心点x坐标为: 155.999994 矩形得出中心点y坐标为: 112.500000
特征匹配中心x坐标: 145.999994 特征匹配中心x坐标: 143.999996
{"size":24, "threshold":20, "normalized":1} matched:146 dt:144
FPS 5.976570
矩形得出中心点x坐标为: 155.999994 矩形得出中心点y坐标为: 112.500000
特征匹配中心x坐标: 152.999997 特征匹配中心x坐标: 135.000002
{"size":27, "threshold":20, "normalized":1} matched:153 dt:135
FPS 5.988024
    
```

(c) Data

图 15 匹配成功与失败的图像及数据

Fig.15 Matching successful and failed images and data

跟踪控制模块采用雷迅 CUAV-X7 PRO 飞行控制系统,视觉模块和跟踪控制模块通过 UART 串口进行发送和接收数据,如图 16 所示。

飞行实验采用 JZ120 交叉双旋翼无人直升机,如图 17 所示。飞行气象条件包括:风力 3 级;温度 31 °C;海拔 550 m。

实验步骤如下:

步骤 1 控制无人直升机姿态模式起飞,控制

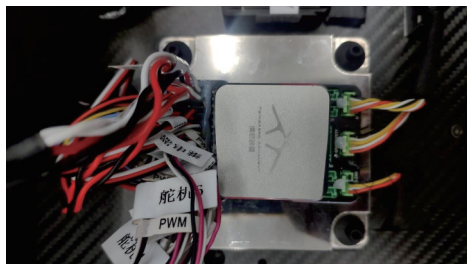


图16 CUAV-X7 PRO飞行控制系统
Fig.16 CUAV-X7 PRO flight control system



图17 JZ120交叉双旋翼无人直升机
Fig.17 JZ120 intermeshing-rotor unmanned helicopter

其悬停在目标上方。

步骤2 判断是否识别到目标,如果识别到目标,会发送目标中心位置到飞控地面站进行显示,此时手动切换为GUIDED导引模式。如果未识别目标,则控制无人直升机前后左右飞行寻找目标。

步骤3 通过人力拉动目标沿着无人直升机左侧的方向(机头为前)移动1.5 m距离,移动速度为0.1 m/s左右。目标发生移动后,由于小速度移动,目标仍处于相机的拍摄范围,若相机未识别目标,无人直升机则自动进行前后左右小距离飞行以寻找目标,观察无人直升机跟踪目标情况。

步骤4 跟踪飞行实验完成后,飞行至指定降落地点上方,切换为LAND降落模式,控制无人直升机完成降落。

交叉双旋翼无人直升机运动速度数量级为100 km/h,本文所考虑的是小距离小速度的情况下对于目标的跟踪,运动速度的数量级为1 m/s左右,姿态角的数量级为 5° 左右。因此,实验过程中,设定最大飞行速度为1 m/s,GUIDED导引模式下跟踪目标时间为20 s。无人直升机飞行路径与期望路径如图18所示。

实验过程中,无人直升机姿态角如图19所示。其中,滚转角最大为 8° 左右,俯仰角最大为 7° 左右,可以满足无人直升机飞行安全需求。

实验过程中,无人直升机位置与期望位置如图20和图21所示。其中,东向(x 方向)位置位移为1.5 m左右,北向(y 方向)位置位移为0.5 m左右,

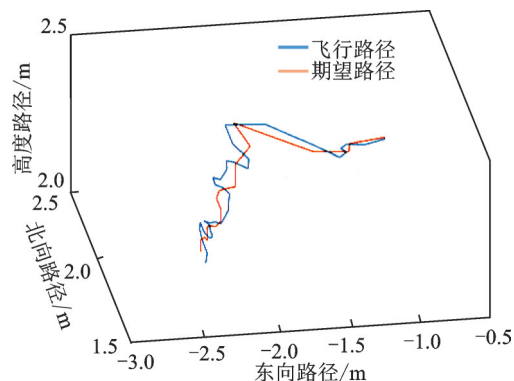


图18 飞行路径与期望路径
Fig.18 Flight path and desired path

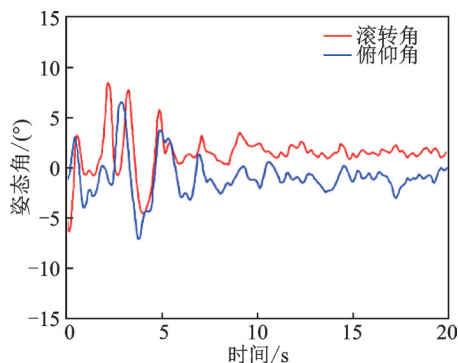


图19 实验姿态角
Fig.19 Experimental attitude angle

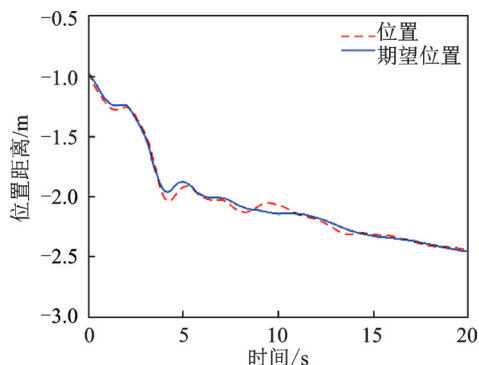


图20 实验东向位置与期望位置
Fig.20 Experimental eastward position and desired position

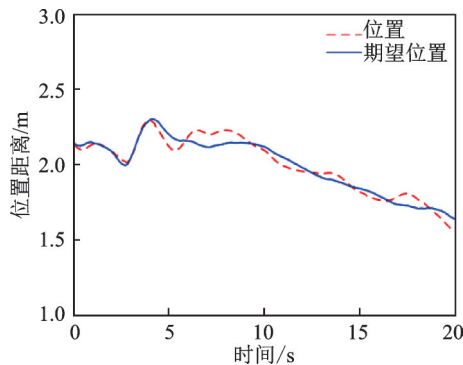


图21 实验北向位置与期望位置
Fig.21 Experimental northward position and desired position

位置与期望位置之间误差最大为0.08 m。位置与期望位置之间的误差越小,说明无人直升机的视觉跟踪的实时性越好,跟踪效果越好。通过位置与期望位置曲线可以看出,无人直升机具有良好的视觉跟踪能力。

6 结 论

本文在交叉双旋翼无人直升机的视觉跟踪问题上,采用基于ORB的视觉模块,通过矩形检测和ORB特征匹配获取目标中心点像素坐标,利用相机模型和旋转矩阵求解相机内外参数,将目标中心点像素坐标转化为目标中心点实际位置。通过所设计的交叉双旋翼姿态控制器和位置控制器,实现了无人直升机的姿态和位置控制,最终通过跟踪控制模块实现了目标跟踪。利用平方根控制器对极限位置和最大加速度进行限制,保证飞行安全性。实验结果表明,视觉跟踪过程中,在设定最大飞行速度为1 m/s的条件下,姿态角最大为8°左右,位置与期望位置之间误差最大为0.08 m,跟踪性能好,可以实现交叉双旋翼无人直升机的视觉跟踪。

参考文献:

- [1] 乔尔特. 独具特色的K-MAX“空中卡车”[J]. 直升机技术, 1997(1): 44-50.
CHALT. Unique K-MAX “aerial truck”[J]. Helicopter Technology, 1997(1): 44-50.
- [2] 李博,王孝通,徐晓刚,等. 基于计算机视觉的舰载直升机助降技术研究[J]. 兵工学报, 2007(3): 370-373.
LI Bo, WANG Xiaotong, XU Xiaogang, et al. Study on assisted landing technology for shipboard helicopter based on computer vision[J]. Acta Armamentarii, 2007(3): 370-373.
- [3] 黄剑雄,刘小雄,章卫国,等. 基于视觉/惯导的无人机组导航算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(2): 137-143, 149.
HUANG Jianxiong, LIU Xiaoxiong, ZHANG Weiguo, et al. Research on vision/inertial based integrated navigation technology of UAVs[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(2): 137-143, 149.
- [4] 任沁源,李平,韩波. 基于视觉信息的微型无人直升机位姿估计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(1): 18-22.
REN Qinyuan, LI Ping, HAN Bo. Vision-based mini unmanned helicopter pose and position estimation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(1): 18-22.
- [5] 张舸,伊国兴,高翔. 基于视觉导航的旋翼无人机自主降落系统[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(9): 77-80, 83.
ZHANG Ge, YI Guoxing, GAO Xiang. Autonomous landing system of rotor UAV based on visual navigation[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(9): 77-80, 83.
- [6] PESTANA J, SANCHEZ-LOPEZ J L, CAMPOY P, et al. Vision based GPS-denied object tracking and following for unmanned aerial vehicles[C]//Proceedings of 2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR).[S.l.]: IEEE, 2013: 1-6.
- [7] XIANG T, JIANG F, LAN G, et al. UAV based target tracking and recognition[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI). [S.l.]: IEEE, 2016: 400-405.
- [8] CHENG H, LIN L, ZHENG Z, et al. An autonomous vision-based target tracking system for rotorcraft unmanned aerial vehicles[C]//Proceedings of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). [S.l.]: IEEE, 2017: 1732-1738.
- [9] 孙铸,刘永. 基于机载单目视觉的无人机移动目标实时跟踪[J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(9): 1749-1754.
SUN Tao, LIU Yong. Real-time moving object tracking of UAV based on on-board monocular vision[J]. Computer & Digital Engineering, 2018, 46(9): 1749-1754.
- [10] 赵麒瑞,韩耀斌,沈惠,等. 上升段飞行器目标的视频图像跟踪[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(S1): 68-72.
ZHAO Qirui, HAN Yaobin, SHEN Hui, et al. Video image tracking of ascending segment aircraft targets[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S1): 68-72.
- [11] 郭力,昂海松,郑祥明. 基于单目视觉的室内微型飞行器位姿估计与环境构建[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(2): 165-171.
GUO Li, ANG Haisong, ZHENG Xiangming. Monocular vision based motion estimation of indoor micro air vehicles and structure recovery[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(2): 165-171.
- [12] AJMERA J, SIDDHARTHAN P R, RAMARAVIND K M, et al. Autonomous visual tracking and landing of a quadrotor on a moving platform[C]//Proceedings of 2015 Third International Conference on Image Information Processing (ICIIP). [S.l.]: IEEE, 2015: 342-347.
- [13] 李靖,马晓东,陈怀民,等. 无人机视觉导航着陆地标实时检测跟踪方法[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(2): 294-301.

- LI Jing, MA Xiaodong, CHEN Huaimin, et al. Real-time detection and tracking method of landmark based on UAV visual navigation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(2): 294-301.
- [14] 毕道明, 黄辉, 范静, 等. 视觉着舰中非合作结构化特征匹配算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 395-401.
- BI Daoming, HUANG Hui, FAN Jing, et al. Non-cooperative structural feature matching algorithm in visual landing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3): 395-401.
- [15] 汲振, 李建胜, 王安成, 等. 一种无人机辅助降落合作标志与匹配算法[J]. 导航定位学报, 2022, 10(5): 68-73.
- JI Zhen, LI Jiansheng, WANG Ancheng, et al. A landmark and matching algorithm for UAV assisted landing[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2022, 10(5): 68-73.
- [16] 钟泽滨. 一种用于车道线识别的图像灰度化方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(S1): 178-182.
- ZHONG Zebin. An image graying method for lane detection[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(S1): 178-182.
- [17] KURUVILLA J, SUKUMARAN D, SANKAR A, et al. A review on image processing and image segmentation[C]//Proceedings of 2016 International Conference on Data Mining and Advanced Computing (SAPIENCE). [S.l.]: IEEE, 2016: 198-203.
- [18] RUBLEE E, RABAUUD V, KONOLIGE K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF [C]// Proceedings of 2011 International Conference on Computer Vision.[S.l.]: IEEE, 2011: 2564-2571.

(编辑:张蓓)